

Е. В. Чухина¹, А. Ю. Шолохова¹, А. В. Желнина^{1,2}, А. Г. Илларионов¹

¹Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина
г. Екатеринбург

²ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА»

**a.g.illarionov@urfu.ru*,

Научный руководитель – доц., канд. техн. наук *А. Г. Илларионов**

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА THERMOCALC ДЛЯ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЛИМОРФНОГО $(\alpha+\beta) \rightarrow \beta$ - ПРЕВРАЩЕНИЯ В ДВУХФАЗНОМ ТИТАНОВОМ СПЛАВЕ

Проведена оценка возможности использования программного комплекса *ThermoCalc* для расчета температуры полиморфного $(\alpha+\beta) \rightarrow \beta$ -превращения ($T_{\text{пт}}$), исходя из химического состава, на примере двухфазного титанового $(\alpha+\beta)$ -сплава мартенситного класса типа Ti-6Al-4V различных плавок. Установлено, что расчетная $T_{\text{пт}}$ имеет существенно завышенные значения по сравнению с производственными данными, полученными методом пробных закалок. Обнаружено, что причиной завышения $T_{\text{пт}}$ при расчете может быть некорректное вычисление содержания кислорода в α -фазе. Показано, что при учете содержания кислорода в сплаве через алюминиевый эквивалент расчетные значения $T_{\text{пт}}$ оказываются сопоставимы с данными метода пробных закалок.

Ключевые слова: титановый сплав, расчет температуры полиморфного превращения, метод пробных закалок.

E. V. Chukhina, A. Yu. Sholokhova, A. V. Zhelnina, A. G. Illarionov

DETERMINATION OF BETA TRANSUS TEMPERATURE OF TITANIUM ALLOY WITH THE USE OF THERMOCAL SOFTWARE

The evaluation of the possibility of using ThermoCalc software package to calculate polymorphic $(\alpha+\beta) \rightarrow \beta$ -transformation temperature (T_{pt}), based on the chemical composition of the example of the two-phase titanium alloy $(\alpha+\beta)$ -martensitic class type Ti-6Al-4V different heats. It was found that the calculated T_{pt} has significantly higher values compared with production data obtained by quenching test. It was found that the cause overstatement T_{pt} in the calculation may be incorrect calculation of the oxygen content of the α -phase. It is shown that taking into account the oxygen content of the alloy by the so-called aluminum equivalent calculated values T_{pt} are comparable to those of the method of trial quenching.

Keywords: titanium alloy, calculate polymorphic transformation temperature, method of trial quenching.

При разработке режимов термической, деформационной обработки титановых сплавов большую роль играет величина температуры полиморфного $(\alpha+\beta)$ – β –превращения. В производственных условиях $T_{\text{пп}}$ обычно определяют методом пробных закалок [1]. Но данный метод достаточно трудоемок и малопроизводителен. В последнее время получают развитие методы расчета $T_{\text{пп}}$, исходя из химического состава сплава [2]. Для определения $T_{\text{пп}}$ по химическому составу сплава теоретически можно использовать программный комплекс *ThermoCalc*, который специализируется на расчете фазовых равновесий в сплавах различного химического состава. В связи с этим, в настоящей работе проведена оценка возможностей *ThermoCalc* для определения температуры полиморфного превращения в сплаве типа Ti-6Al-4V различного химического состава.

В качестве материала для исследования были использованы образцы от 20-ти промышленных плавочных составов производства ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА» из сплавов типа Ti-6Al-4V, включая различное содержание примесей (C, N, O, Fe), в первую очередь кислорода. Для всех составов $T_{\text{пп}}$ была определена экспериментально и методом пробных закалок. Полученные данные представлены в таблице.

При определении $T_{\text{пп}}$ в программном комплексе *ThermoCalc* использовали сначала плавочный состав сплавов. Сопоставление данных эксперимента и термодинамических расчетов (таблица) наглядно показывает, что расчет дает существенно завышенные значения по сравнению с экспериментом – разница может достигать более 170 °С. Если интервал экспериментальных $T_{\text{пп}}$ лежит в пределах 993–1040 °С, то расчетных – в интервале 1063–1183 °С. Причиной такого расхождения может являться недостаток необходимых термодинамических данных для расчета фазовых равновесий в титановых сплавах с большим количеством элементов (в нашем случае семь и более). В частности, анализ термодинамических расчетов показал, что в них может не совсем корректно определяться равновесное содержание кислорода в α -фазе при нагреве (см. рис.), давая завышенные значения.

Это, на наш взгляд, основная причина получения более высокой $T_{\text{пп}}$ при расчетах, так как именно кислород является сильным α -стабилизатором [1]. В связи с этим был проведен термодинамический расчет равновесия в программном комплексе *ThermoCalc* для анализируемых сплавов таким образом, что содержание кислорода в сплаве учитывалось не напрямую, а косвенно через алюминиевый эквивалент. В таком виде при указании состава сплава кислород включался в виде повышенного содержания алюминия через алюминиевый

эквивалент [3] по формуле $Al_{\text{экв}} = \% Al + 20 \cdot \% O$. Полученные результаты представлены в таблице.

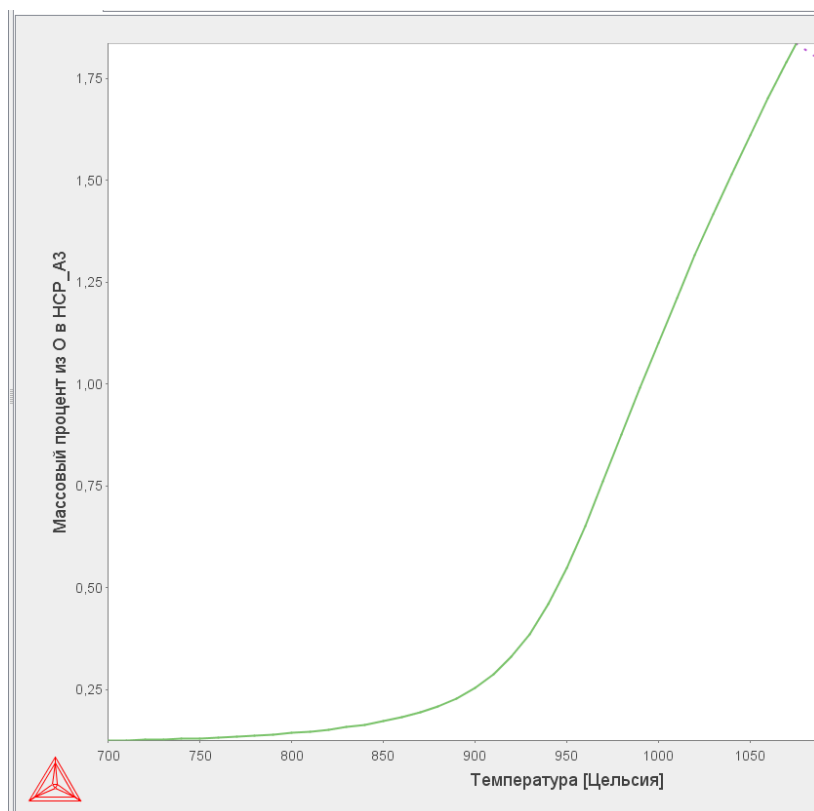
Таблица

Данные по содержанию кислорода, экспериментальной и расчетным $T_{\text{пп}}$ в исследуемых сплавах типа Ti-6Al-4V

№ сплава	% O, мас. %	$T_{\text{пп}} \text{ эксп, } ^\circ\text{C}$	$T_{\text{пп}} \text{ расч, } ^\circ\text{C}$ (по плавочному составу)	$Al_{\text{экв}}$	$T_{\text{пп}} \text{ расч}^*, ^\circ\text{C}$ (через $Al_{\text{экв}}$)	$\Delta = T_{\text{пп}} \text{ эксп} - T_{\text{пп}} \text{ расч}^*, ^\circ\text{C}$
1	0,1095	993	1074	8,35	975	18
2	0,1095	993	1069	8,285	976	17
3	0,1095	1003	1063	8,42	984	19
4	0,1105	998	1066	8,36	980	18
5	0,1135	998	1069	8,33	980	18
6	0,168	1008	1138	9,71	1003	15
7	0,17	1006	1113	9,66	1007	-1
8	0,1705	1006	1147	9,85	1002	4
9	0,1735	1003	1125	9,945	1008	-5
10	0,176	1001	1173	9,795	1006	-5
11	0,178	1020	1147	9,715	1005	15
12	0,183	1001	1132	10,335	1021	-20
13	0,1835	1018	1073	10,13	1009	9
14	0,1885	1003	1071	10,395	1020	-17
15	0,1895	1023	1148	10,29	1015	8
16	0,1935	1016	1165	10,215	1012	4
17	0,19565	1016	1172	10,463	1017	-1
18	0,196	1018	1070	10,19	1012	6
19	0,2	1018	1176	10,415	1019	-1
20	0,21	1040	1183	10,345	1014	26

Из таблицы видно, что учет содержания кислорода в сплаве через $Al_{\text{экв}}$ дает более сопоставимые с экспериментом данные по $T_{\text{пп}}$. Но и в этом случае ошибка в определении $T_{\text{пп}}$ с использованием программы *ThermoCalc*, достаточно высокая (см. таблицу) и для исследованной группы сплавов может быть 20 $^\circ\text{C}$ и выше как в сторону занижения, так и в сторону завышения (по сравнению с экспериментом, в котором ошибка обычно не более 5 $^\circ\text{C}$).

Таким образом, проведенное исследование показало, что использование программного комплекса *ThermoCalc* для определения $T_{\text{пп}}$ по плавочному составу двухфазных титановых сплавов типа Ti-6Al-4V дает существенно завышенные значения по сравнению с экспериментальными данными, полученными методом пробных закалок. Причиной завышения $T_{\text{пп}}$ при расчете может быть некорректное вычисление содержания кислорода в α -фазе с температурой нагрева.



Изменение содержания кислорода в α -фазе в сплаве типа Ti-6Al-4V (плавочный состав № 13) с температурой по данным термодинамических расчетов в программе *ThermoCalc*

Учет содержания кислорода в сплаве через алюминиевый эквивалент позволяет получить расчетные значения T_{III} , сопоставимые с данными метода пробных закалок, но получаемая ошибка существенно выше, чем регламентированная в производстве.

Работа выполнена при содействии программы поддержки ведущих университетов РФ в целях повышения их конкурентоспособности №211 Правительства РФ №02.А03.21.0006.

ЛИТЕРАТУРА

1. Металлография титановых сплавов // под ред. Н. Ф. Аношкина, [и др.]. М., Металлургия, 1980, С. 36.
2. Колачев Б. А. Егорова Ю. Б., Белова С. Б. О связи температуры $\alpha + \beta \rightarrow \beta$ -перехода промышленных титановых сплавов с их химическим составом // МиТОМ. 2008. № 8. С. 10–14.
3. Ильин А. А., Колачев Б. А., Полькин И. С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. Справочник. М. : ВИС-МАТИ. 2009. 520 с.